

Dinamika Fosfat Pada Aplikasi Kompos Jerami-Biochar dan Pemupukan Fosfat Pada Tanah Sawah

Phosphate Dynamics on The Application of Rice Straw Compost-Biochar and Phosphate Fertilization in Rice Fields

Ania Citraesmini dan Taufiq Bachtiar

Pusat Aplikasi Isotop dan Radiasi, BATAN
JL. Lebak Bulus Raya No. 49 Jakarta 12440
Email : aniacitra@batan.go.id

Diterima 16-09-2016; Diterima dengan revisi 03-10-2016; Disetujui 01-12-2016

ABSTRAK

Produktivitas tanah ditentukan oleh karakteristik tanah, yang terdiri dari sifat fisik, kimia dan biologi tanah. Keterkaitan di antara ketiga sifat tersebut dapat diwakili oleh satu indikator yaitu kandungan karbon dalam tanah. Salah satu dampak dari pemenuhan kebutuhan bahan organik tanah adalah terpenuhinya kebutuhan unsur hara, terutama hara utama yang menjadi pembatas pada pertanaman padi sawah. Dalam hal ini unsur hara P menjadi faktor pembatas, karena seringkali berada dalam jumlah berlimpah namun dalam bentuk yang tidak dapat dimanfaatkan oleh tanaman. Percobaan dilakukan dengan tujuan mempelajari dampak aplikasi bahan organik kompos jerami yang diintegrasikan dengan Biochar, terhadap ketersediaan hara P pada tanah sawah. Interaksi kompos jerami+Biochar dengan inokulan BPF dan sumber-sumber P menjadi rancangan perlakuan yang diujikan dalam percobaan. Disain percobaan menerapkan rancangan acak kelompok dengan pola faktorial, menetapkan dosis aplikasi kompos jerami+Biochar sebagai taraf pertama yang terdiri dari 5 taraf level : 0; 1; 2; 3; 4 t ha⁻¹. Faktor kedua adalah sumber P, yang terdiri dari 5 taraf level : tanpa fosfat (p₀); 100 kg ha⁻¹ pupuk SP-36 (p₁); fosfat alam pada dosis 163 kg ha⁻¹ (p₂); inokulan BPF pada dosis 2 kg ha⁻¹ (p₃); dan fosfat alam berinokulan BPF (p₄). Percobaan dilaksanakan di rumah kaca kebun percobaan PAIR – BATAN, Jakarta, pada bulan Maret 2014. Dinamika P akibat perlakuan yang diujikan, digambarkan dari hasil penelusuran menggunakan radioisotop ³²P aktivitas 30 mCi melalui serapan P pada tanaman padi varietas Sidenuk. Hasil percobaan menunjukkan perlakuan yang diberikan menyebabkan perbedaan signifikan pada respons kandungan C-organik tanah, jumlah populasi BPF, cacahan ³²P tanaman dan serapan P dari berbagai sumber di dalam tanaman padi.

Kata kunci : Biochar, BPF, fosfat alam, isotop ³²P, kompos jerami

ABSTRACT

Soil productivity is determined by soil characteristics itself, which consist of physical, chemical and biological character. The linkage between these three properties can be represented by a single indicator, namely the carbon content in the soil. One of the effects of soil organic matter fulfillment is the availability of soil nutrients, especially to the nutrient that limits the lowland rice production. In this case, P (phosphorus) nutrient become a limiting factor because their numbers are often in abundance but in a form that can not be used by plants. Experiments were carried out with the aim of studying the impact of straw compost application that integrates with Biochar, to the availability of P in lowland soil. The interaction of straw compost+Biochar with PSB inoculant and P sources, become the treatment that being tested in the experiment. Randomized Block Design with factorial pattern is applied as design experiment. As the first factor is the application dose of straw compost+Biochar, consists of 5 levels of treatment : 0; 1; 2; 3; 4 t ha⁻¹. Second factor is several sources of P, consist of 5 levels of treatment : without P sources (p₀); 100 kg ha⁻¹ SP-36 fertilizer (p₁); rock phosphate at the dose of 163 kg ha⁻¹ (p₂); PSB inoculant at the inoculation dose of 2 kg ha⁻¹ (p₃); and rock phosphate inoculated with PSB (p₄). The experiment done in the green house of PAIR-BATAN experimental station, Jakarta, on March-July 2014. Phosphorus dynamic as a result of the tested treatments, determined by using radioisotope ³²P technology at the activity of 30 mCi and described clearly on the plant P uptake data of Sidenuk rice plant variety. The experiment result showed that the treatments applied is causing significantly different responses on the soil C-organic, the number of PSB populations, ³²P plant counting and plant P uptake derived from several P sources in the plant.

Keywords : Biochar, isotope ³²P, PSB, rock phosphate, straw compost

PENDAHULUAN

Permasalahan pada sektor pertanian tidak hanya terbatas pada penyusutan luas lahan yang berkurang sebanyak 50.000 – 100.000 ha per tahun [1], namun juga pada kemunduran kesuburan tanahnya yang terjadi secara signifikan. Penyebab terjadinya kemunduran kesuburan tanah adalah pemakaian pupuk kimia secara intensif dan pengurasan unsur hara di dalam tanah karena pemacuan produksi tanpa adanya pengembalian atau penambahan bahan organik ke dalam tanah [2]. Upaya pemulihan kesuburan tanah dapat dilakukan dengan mengaplikasikan bahan pembenah tanah.

Berbagai residu tanaman memiliki potensi untuk dimanfaatkan sebagai pembenah tanah, karena ketersediaannya yang melimpah, mudah didapat dan ramah lingkungan. Residu tanaman ini dapat memperbaiki dan meningkatkan sifat fisik, kimia, dan biologi tanah. Pada lahan sawah, setiap musim tanamnya dihasilkan jerami sebanyak 2-9 t ha⁻¹ [3] yang sangat berpotensi untuk dijadikan sebagai bahan organik setelah mengalami pengomposan. Kompos jerami ini mengandung nutrisi hara dan asam-asam organik yang dapat dimanfaatkan oleh mikroorganisme untuk aktivitas metabolisme dalam peranannya pada siklus nutrisi hara [4].

Residu pertanaman padi selain jerami adalah sekam padi, yang dihasilkan pada proses penggilingan gabah. Potensi produksi sekam adalah 16-21% dari berat bersih beras yang dihasilkan [5, 6]. Kandungan sekam padi 75-90% adalah bahan organik (selulosa dan lignin), mineral silika dan unsur mikro lainnya [7]. HAEFELE dkk. [8] menyatakan bahwa sekam sebagai material organik merupakan biomassa dengan kandungan karbon organik yang ringan dan sulit untuk terdekomposisi. Dengan kandungan bahan organik yang dimiliki dan sifat yang sulit terdekomposisi, menjadikan sekam padi bahan yang potensial untuk dimanfaatkan sebagai bahan pembenah tanah. Nurida dan Rachman [9] menyatakan bahwa materi bahan pembenah tanah dengan persistensi yang tinggi terhadap pelapukan (misalnya sekam padi, tempurung kelapa, dan sisa-sisa tanaman berkayu) dapat mempercepat pemulihan kesehatan tanah karena adanya resistensi terhadap aktivitas dekomposisi oleh mikroorganisme.

Aplikasi sekam padi dalam bentuk arang sekam, adalah upaya untuk menambahkan jumlah

karbon ke dalam tanah secara cepat dan persisten. Sekam padi yang telah diarang dinamakan Biochar, dan proses pengarangan yang dilakukan dalam kondisi minim oksigen dikenal sebagai teknik pirolisis. Biochar adalah bahan pembenah tanah yang memiliki kandungan karbon hitam tinggi dan sulit untuk terdekomposisi sehingga dapat berada dalam jangka waktu lama [8, 10, 11]. Penambahan Biochar pada kompos jerami meningkatkan efektivitas bahan organik sebagai pupuk dan pembenah tanah dalam memperbaiki kesuburan dan kesehatan tanah [12]. Ponamperuma [13] menyatakan bahwa pengaplikasian jerami dan sekam padi secara bersamaan, dapat meningkatkan sifat-sifat tanah seperti perbaikan kepadatan tanah, peningkatan pH, penambahan kandungan karbon organik, dan penyediaan unsur hara bagi tanah. DE LUCA dkk. [11] menyatakan bahwa kompos jerami dan Biochar mampu memperbaiki sifat fisika, kimia dan biologi tanah. Memperkaya kompos jerami dengan Biochar merupakan formulasi terbaik dalam usaha perbaikan sifat biofisik tanah, meningkatkan suplai unsur hara, efisiensi penggunaan pupuk sintetis, dan meningkatkan hasil tanaman [14]. Nutrisi yang terkandung dalam masing-masing bahan juga dapat memberikan kontribusi yang cukup baik bagi pertanaman padi di lahan sawah, karena adanya kandungan hara sebagai berikut : kandungan hara jerami padi terdiri dari 30-40% total C-organik yang kaya humus dan asam-asam organik, 1-1,5% P₂O₅, 0,5% N, 2-3% K₂O, 3-5% SiO₂; dan kandungan Biochar sekam padi terdiri dari 0,72-3,84% K₂O, 0,23-1,59% MgO, 0,001-2,69% P₂O₅ [5]. Karbon yang terkandung dalam pembenah tanah dapat berfungsi sebagai substrat energi bagi mikroorganisme dalam tanah.

Kebutuhan akan unsur fosfat pada pertanaman padi sawah menjadi hal yang mutlak harus terpenuhi karena ketersediaan unsur ini pada tanah sawah tergolong rendah, dalam konsentrasi kurang dari 0,01% dari total P tanah. Hal ini menyebabkan unsur P menjadi faktor pembatas bagi produktivitas tanah dan tanaman padi, meskipun kebanyakan tanah sawah di Indonesia telah mengalami jenuh P. Rendahnya pemanfaatan P pada lahan sawah disebabkan tingginya penyerapan P oleh koloid tanah dan oleh unsur-unsur logam sehingga unsur P menjadi tidak tersedia, dan penambahan P melalui pupuk tidak efisien.

Pemanfaatan sumber hara P yang bersifat lepas lambat, dapat menjadi alternatif solusi bagi peningkatan efisiensi penggunaan P. Batuan fosfat memiliki potensi untuk dimanfaatkan secara langsung sebagai sumber P alami, yang bersifat lepas lambat. Tingkat kelarutan P yang rendah dapat diatasi dengan penginokulasian bakteri pelarut fosfat (BPF), yang selain memudahkan pelarutan P juga meningkatkan serapan hara P oleh tanaman sehingga pemupukan menjadi lebih efisien. Bakteri *Pseudomonas* sp dan *Bacillus* sp adalah jenis BPF yang sangat penting dan telah banyak dimanfaatkan sebagai pupuk hayati [15]. Hasil penelitian Widiawati dan Suliasih [16] menunjukkan bahwa *Pseudomonas* sp dan *Bacillus* sp memiliki kemampuan yang baik dalam melarutkan fosfat. Bakteri ini berperan dalam proses transfer energi, penyusunan protein, koenzim, asam nukleat dan senyawa metabolik lainnya yang dapat meningkatkan aktivitas penyerapan P pada tanaman yang tumbuh pada lingkungan dengan P rendah. Efektivitas inokulan BPF dalam proses mineralisasi P organik dipengaruhi oleh produksi enzim oleh BPF itu sendiri, terdiri dari enzim fosfatase, fitase dan nuklease.

Serapan P tanaman bergantung kepada potensi fisiologis tanaman dan ketersediaan P dalam tanah, yang disebabkan oleh proses fisika, kimia dan biologi di dalam tanah. RONDON dkk. [17] mengemukakan bahwa kompos jerami dan Biochar dapat meningkatkan aktivitas, kepadatan dan keberagaman mikroba tanah, seperti misalnya Bakteri Penambat Nitrogen (BPN) dan Bakteri Pelarut Fosfat (BPF). Pori-pori mikro yang dimiliki Biochar, berukuran sekitar 1-2 μm dapat menjadi habitat kolonisasi bakteri dan juga berfungsi sebagai penyedia air dan nutrisi sehingga menjadi lingkungan tumbuh yang sesuai untuk mikroorganisme [18]. Selain itu dengan adanya pengaplikasian Biochar maka terjadi peningkatan luas permukaan tanah yang mempengaruhi daya konduktifitas tegangan hidrolik air dan unsur hara, sehingga serapan aliran nutrisi lebih cepat terangkut oleh jaringan xylem tanaman [19]. Dengan demikian maka pemberian Biochar diharapkan dapat menekan kehilangan unsur hara akibat peristiwa *volatilisasi*, *leaching*, *runoff* dan pengikatan oleh senyawa lainnya, dan meningkatkan efisiensi penggunaan pupuk oleh tanaman. Hasil penelitian TANAKA dkk. [20] dan VAN ZWETEIN dkk. [21] menunjukkan bahwa pemberian kompos jerami

dan Biochar pada dosis 1-5 t ha⁻¹ di dalam tanah, secara signifikan dapat meningkatkan serapan nitrogen, fosfat, dan efisien pemupukan di lahan sawah.

Berbagai penelitian telah dapat menunjukkan efektivitas bahan organik terhadap peningkatan pelarutan fosfat, namun belum banyak penjelasan kontribusi kuantitatif perlakuan terhadap dinamika P di dalam tanah yang dirunut melalui serapan P di dalam tanaman. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui dinamika P di dalam tanah sebagai dampak aplikasi kompos jerami+Biochar dengan Bakteri Pelarut Fosfat (BPF) yang diinokulasikan pada fosfat alam. Melalui penelitian ini dapat dibuktikan adanya perbaikan sifat kimia tanah sawah, yaitu peningkatan kandungan karbon yang mampu menstimulasi kekuatan biologi dalam tanah. Peningkatan kandungan karbon dan jumlah pori mikro dapat meningkatkan aktivitas pelarutan P dan mempertahankan keberadaan BPF, sehingga secara hipotesis pemberian kompos jerami-Biochar akan meningkatkan ketersediaan P di dalam tanah. Teknik radioisotop ³²P diterapkan dalam penelitian, untuk mendapatkan informasi kontribusi sumber P terhadap serapan P yang dilakukan oleh tanaman. Dengan mengetahui asal keberadaan P di dalam tubuh tanaman, maka dapat ditentukan inokulan BPF dan sumber P yang memberikan kontribusi paling besar bagi tanaman dengan efisiensi penggunaan yang lebih tinggi dibandingkan dengan sumber P lainnya.

BAHAN DAN METODE

Percobaan dilaksanakan di rumah kaca kebun percobaan PAIR-BATAN, Jakarta, pada bulan Maret 2014. Bahan yang digunakan dalam percobaan ini adalah : (1) benih padi varietas Sidenuk; (2) Tanah sawah ordo Inceptisols daerah Ciparay; (3) kompos jerami; (4) Biochar sekam padi; (5) pupuk SP-36, fosfat alam Blora (22% P₂O₅), konsorsium inokulan BPF (*Bacillus* sp + *Pseudomonas* sp), urea dan KCl sebagai pupuk dasar; (6) radioisotop ³²P dalam pembawa KH₂³²PO₄ bebas pengemban, dengan aktivitas 30 mCi; (7) pereaksi kimia untuk analisis kandungan C-organik (metode Walkley and Black), penentuan P-total, pencacahan ³²P dalam sampel tanaman, dan serapan P tanaman (metode destruksi basah).

Jerami padi dikomposkan dengan bantuan agen dekomposer yang diinkubasikan selama 14-30 hari. Dosis agen dekomposer 500 g dilarutkan dalam 100 L air untuk mendapatkan suspensi inokulan dekomposer. Sekam padi dijadikan Biochar dengan cara pengarangannya menggunakan teknik pirolisis. Dilakukan pencampuran kompos jerami dengan Biochar pada perbandingan 60% kompos:40% biochar, berdasarkan hasil penelitian CITRARESMINI [2]. Tanah dalam pot percobaan sebanyak 15 kg dilumpurkan (± 3 minggu) untuk mencapai keadaan seperti tanah sawah, lalu diinkubasi dengan kompos jerami + Biochar. Penginkubasian dilakukan 1 minggu sebelum tanam dengan dosis sesuai perlakuan. Pelabelan tanah percobaan dengan isotop ^{32}P dilakukan satu hari sebelum penanaman. Benih padi disemaikan

terlebih dahulu, lalu pada umur semai 10 hari dipindahtanamkan ke dalam pot percobaan.

Percobaan menerapkan desain rancangan acak kelompok (RAK) pola faktorial, terdiri dari dua faktor. Faktor pertama adalah dosis kompos jerami-Biochar, terdiri dari 5 taraf : 0, 1, 2, 3, 4 t ha^{-1} . Faktor kedua adalah sumber P yang terdiri dari 5 taraf : tanpa pupuk P, pupuk SP-36 pada taraf rekomendasi (100 kg ha^{-1}), fosfat alam (dosis setara 100 kg ha^{-1} SP-36), konsorsium inokulan BPF, fosfat alam+konsorsium inokulan BPF. Dengan demikian terdapat 25 kombinasi perlakuan, yang masing-masing diulang sebanyak 3 kali sehingga total pot percobaan adalah 75 pot.

Kepadatan populasi BPF yang diinokulasikan pada bahan pembawa adalah $3,17 \times 10^8$ cfu g^{-1} , dengan dosis inokulasi 2 kg ha^{-1} ,

Tabel 1. Kombinasi perlakuan yang diterapkan dalam percobaan.

Dosis Komchar = k (t ha^{-1}) Sumber fosfat (p)		k ₀	k ₁	k ₂	k ₃	k ₄
		0	1	2	3	4
p ₀ =	0 P (kontrol)	p ₀ k ₀	p ₀ k ₁	p ₀ k ₂	p ₀ k ₃	p ₀ k ₄
p ₁ =	100 kg ha^{-1} SP-36	p ₁ k ₀	p ₁ k ₁	p ₁ k ₂	p ₁ k ₃	p ₁ k ₄
p ₂ =	konsorsium inokulan BPF	p ₂ k ₀	p ₂ k ₁	p ₂ k ₂	p ₂ k ₃	p ₂ k ₄
p ₃ =	163 kg ha^{-1} FA	p ₃ k ₀	p ₃ k ₁	p ₃ k ₂	p ₃ k ₃	p ₃ k ₄
p ₄ =	163 kg ha^{-1} + konsorsium inokulan BPF	p ₄ k ₀	p ₄ k ₁	p ₄ k ₂	p ₄ k ₃	p ₄ k ₄

Tabel 2. Respons kandungan C-organik tanah pada interaksi perlakuan dosis kompos jerami+Biochar dan sumber-sumber hara P.

Sumber hara P	Dosis kompos jerami+Biochar (t ha^{-1})				
	0 (k ₀)	1 (k ₁)	2 (k ₂)	3 (k ₃)	4 (k ₄)
% C					
0 (p ₀)	1,20 a	1,22 a	1,28a	1,25 a	1,25 a
	A	A	B	A	A
100 kg ha^{-1} SP-36 (p ₁)	1,35b	1,53 b	1,67 b	1,94b	1,93 b
	A	B	B	C	C
2 kg ha^{-1} inokulan BPF (p ₂)	1,25 a	1,47 b	2,01 c	2,11 b	2,10 c
	A	B	C	C	C
163 kg ha^{-1} FA (p ₃)	1,25a	1,44 b	1,76cd	2,04 b	2,01 b
	A	A	B	C	C
163 kg ha^{-1} FA + inokulan BPF (p ₄)	1,30 ab	1,92 c	2,10d	2,27 c	2,22d
	A	B	B	C	C

Keterangan : Angka yang ditandai huruf sama tidak berbeda nyata pada uji BNT taraf 5%. Huruf kecil dibaca ke arah vertikal, huruf besar dibaca ke arah horisontal.

berdasarkan hasil penelitian terdahulu. Dosis inokulasi ini dipilih berdasarkan teknik inokulasi yang diterapkan, yaitu *seedling treatment* atau teknik pencelupan akar benih tanaman [15]. Parameter yang diamati dalam percobaan ini adalah : kandungan C-organik tanah; jumlah populasi BPF; cacahan ^{32}P tanaman; dan serapan P tanaman dari masing-masing sumber P.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Kandungan C-organik tanah

Kandungan C-organik tanah pada setiap perlakuan menunjukkan respons yang berbeda akibat interaksi perlakuan kompos jerami+Biochar dengan sumber-sumber hara P.

Respons terbaik kandungan C-organik tanah (2,27%) akibat interaksi pemberian kompos jerami+Biochar dengan sumber hara P ditunjukkan oleh perlakuan 3 t ha⁻¹ kompos jerami+Biochar + 163 kg ha⁻¹ FA+inokulan BPF (p_{4k3}).

Data pada Tabel 2 menunjukkan secara umum penambahan dosis kompos jerami+Biochar meningkatkan kandungan karbon dalam tanah. Hal ini disebabkan terjadinya penambahan karbon stabil berasal dari Biochar yang bercampur dengan kompos jerami. Pemberian kompos jerami+Biochar pada dosis 2 t ha⁻¹ secara statistik telah mampu meningkatkan kandungan karbon setara dengan pemberian pada dosis 3 dan 4 t ha⁻¹, pada saat berinteraksi dengan inokulasi BPF dosis 2 kg ha⁻¹ (perlakuan p_{2k2}, p_{2k3}, p_{2k4}). Dalam hal ini diduga pemberian inokulan bakteri pelarut fosfat mampu meningkatkan pelepasan P yang ada di dalam tanah sehingga menjadi sumber energi bagi mikroba tanah dalam aktivitas metabolismenya dan meningkatkan kandungan karbon tanah. Kompos jerami yang diaplikasikan bersama Biochar, menjadi sumber karbon potensial bagi mikroorganisme tanah dan berkontribusi terhadap peningkatan kandungan karbon. RUSSEL dkk. [22] dan DAS dkk. [23] menjelaskan bahwa ketersediaan unsur hara dalam tanah menjadi sumber energi bagi mikroorganisme untuk meningkatkan aktivitas perombakan bahan organik, yang berarti peningkatan kandungan karbon tanah.

Peningkatan kandungan karbon tanah semakin baik pada saat terjadi interaksi pemberian kompos jerami+Biochar dengan 163 kg ha⁻¹ fosfat alam yang diinokulasi dengan BPF. Dalam hal ini

terjadi peningkatan ketersediaan P dalam tanah, yang tidak hanya bersumber dari P dalam tanah saja. Adanya penginokulasian BPF semakin mempermudah pelarutan P dari fosfat alam, dan diduga juga berinteraksi dengan P tanah. Hasil analisis tanah awal terhadap tanah percobaan inceptisols asal Ciparay pada percobaan NOVIANI (2014) dalam CITRARESmini [2], diketahui bahwa kandungan P₂O₅ potensial tanah tergolong pada kriteria sedang yakni 20,82 mg 100 g⁻¹. TANAKA dkk. [20] menyatakan bahwa terdapat interaksi antara kandungan bahan organik terhadap pelarutan P di dalam tanah. Kandungan P₂O₅ potensial menjadi bahan baku bagi aktivitas mikroorganisme dalam mengubahnya menjadi P tersedia. Proses dekomposisi bahan organik pada kompos jerami menghasilkan asam-asam organik yang membantu pelepasan P₂O₅ potensial tanah dan menjadi sumber energi bagi mikroorganisme *indigenous* dan inokulan BPF. Fosfat yang terlarut tidak hanya dimanfaatkan oleh tanaman, namun juga oleh mikroorganisme dalam memenuhi kebutuhan produksi enzimnya. Kondisi ini menjelaskan tingginya kandungan karbon tanah pada saat terjadi interaksi dengan sumber P yang diinokulasi oleh BPF (perlakuan p_{4k3}). Secara statistika, perlakuan p_{4k3} tidak berbeda dengan perlakuan p_{4k4}. Hal ini bermakna pemberian bahan organik kompos jerami+Biochar sebanyak 3 t ha⁻¹ mampu memberikan respons peningkatan kandungan C-organik setara dengan pemberian kompos jerami+Biochar sebanyak 4 t ha⁻¹.

Kenaikan kandungan karbon tanah yang terjadi hampir signifikan dengan peningkatan dosis aplikasi kompos jerami+Biochar, diduga disebabkan bentuk karbon stabil (*recalcitrant*) pada Biochar. NAQVI dkk. [24] menyatakan bahwa bentuk karbon dalam Biochar adalah kelompok humus asam-asam organik dan phenol, yang merupakan salah satu senyawa aromatik dan merupakan bentuk karbon yang telah stabil. Senyawa *recalcitrant* ini dapat mencegah proses kehilangan karbon disebabkan oleh pencucian dan dekomposisi mikrobial.

Jumlah populasi BPF

Peranan mikroorganisme dalam siklus ketersediaan unsur hara, menjadikan mikroorganisme ikut menjadi penentu dalam hal kesuburan dan kesehatan tanah. Perubahan dalam kondisi tubuh tanah pun dapat dilihat dari dinamika populasi dan aktivitas bakteri [25]. Penambahan bahan organik ke dalam tanah

berperan dalam penyediaan sumber energi dan mikrohabitat bagi mikroorganisme tanah, sehingga dapat meningkatkan biomassa dan populasi mikroba dalam tanah.

Pengaruh aplikasi kompos jerami+Biochar pada percobaan ini difokuskan terhadap populasi bakteri pelarut fosfat, karena adanya aplikasi BPF pada tanah dan fosfat alam. Hasil analisis statistik menunjukkan bahwa interaksi kompos jerami+Biochar dengan sumber-sumber P menyebabkan perbedaan respons jumlah populasi BPF (Tabel 3).

pemberian kompos jerami+Biochar meningkatkan karbon tanah (lihat Tabel 2) sehingga menjadi sumber energi bagi mikroorganisme tanah, khususnya BPF, untuk mempertahankan dan meningkatkan jumlah populasinya di dalam tanah. Selain itu pemberian fosfat alam yang diinokulasi oleh BPF menyebabkan pelepasan P ke dalam tanah, dan P yang terlepas menjadi sumber nutrisi bagi populasi bakteri.

Pemberian sumber hara P secara nyata meningkatkan jumlah populasi BPF. Pada sumber P 100 kg ha⁻¹ pupuk SP-36 (p₁) yang berinteraksi

Tabel 3. Respons jumlah populasi BPF pada interaksi perlakuan dosis kompos jerami+Biochar dan sumber-sumber hara P.

Sumber hara P	Dosis kompos jerami+Biochar (t ha ⁻¹)				
	0 (k ₀)	1 (k ₁)	2 (k ₂)	3 (k ₃)	4 (k ₄)
	10 ⁸ cfu g ⁻¹				
0 (p ₀)	18,70 a	20,32 a	31,45a	32,25 a	35,18 a
	A	A	B	B	B
100 kg ha ⁻¹ SP-36 (p ₁)	21,64a	22,14a	28,22a	35,82a	40,23 b
	A	A	AB	B	C
2 kg ha ⁻¹ inokulan BPF (p ₂)	29,57b	31,89 b	52,17b	59,24b	44,19b
	A	B	C	C	D
163 kg ha ⁻¹ FA (p ₃)	30,33b	34,28b	41,92c	38,27a	43,55 b
	A	A	B	C	B
163 kg ha ⁻¹ FA + inokulan BPF (p ₄)	41,19c	53,24c	52,73b	59,77b	55,98c
	A	B	B	C	C

Keterangan : Angka yang ditandai huruf sama tidak berbeda nyata pada uji BNT taraf 5%. Huruf kecil dibaca vertikal, huruf besar dibaca horizontal.

Data pada Tabel 3 menunjukkan jumlah populasi BPF memperlihatkan kecenderungan peningkatan pada saat dosis kompos jerami+Biochar ditingkatkan. Dalam hal ini diduga keberadaan kompos jerami menjadi sumber energi bagi mikroorganisme, dan keberadaan Biochar menjadi mikrohabitat yang baik untuk mikroorganisme *indigenous* tanah dan inokulan BPF yang ditambahkan [18].

Respons jumlah populasi tertinggi diperoleh pada perlakuan 3 t ha⁻¹ kompos jerami+Biochar yang berinteraksi dengan 163 kg ha⁻¹ FA+inokulan BPF (p₄k₃), dan secara statistik tidak berbeda nyata dengan perlakuan 4 t ha⁻¹ kompos jerami+Biochar yang berinteraksi dengan sumber P yang sama (p₄k₄). Dalam hal ini diduga

dengan pemberian kompos jerami+Biochar dengan dosis yang semakin meningkat, terjadi peningkatan jumlah populasi BPF. Dalam hal ini diduga BPF yang terdapat di dalam tanah teraktivasi oleh ketersediaan nutrisi hara anorganik dari pupuk SP-36 yang dapat segera dimanfaatkan [15]. Keberadaan kompos jerami+Biochar menjadi bahan baku bagi mikroorganisme tanah untuk melakukan perombakan dan menghasilkan asam-asam organik yang antara lain dimanfaatkan untuk meningkatkan jumlah populasi. Karbon stabil berasal dari Biochar berperan sebagai pemasok sumber energi dan juga sebagai mikrohabitat bagi mikroorganisme tanah. Diduga hal ini pun berlaku pada kondisi sumber hara P lainnya selain pupuk

SP-36, yang mengalami kecenderungan peningkatan populasi BPF saat berinteraksi dengan kompos jerami+Biochar pada berbagai dosis aplikasinya.

Peningkatan jumlah populasi BPF pada perlakuan p_2 terlihat lebih besar dibandingkan dengan perlakuan p_3 , disebabkan penambahan populasi BPF pada p_2 melalui inokulasi ke dalam tanah. Hal ini pula menjelaskan peningkatan jumlah koloni BPF yang lebih besar pada interaksinya dengan kompos jerami+Biochar pada perlakuan k_2 , k_3 dan k_4 . Kondisi ini mengindikasikan adanya kompatibilitas inokulan BPF dengan kompos jerami+Biochar pada dosis 3 dan 4 t ha⁻¹. Namun demikian pada dosis kompos jerami+Biochar 4 t ha⁻¹ terlihat penurunan jumlah koloni BPF pada perlakuan p_2 . Diduga hal ini disebabkan tidak tercukupinya kebutuhan nutrisi hara bagi mikroorganisme, karena sumber nutrisi P yang tersedia hanya berasal dari tanah. Selain itu

nilai cacahan ^{32}P di dalam tanaman, menunjukkan tanaman lebih banyak menyerap unsur hara P dari dalam tanah. Hal ini disebabkan pelabelan radioisotop ^{32}P ditujukan pada tanah, sehingga unsur P yang ditandai adalah unsur P *indigenous* tanah. Sebaliknya, apabila nilai cacahan ^{32}P di dalam tanaman rendah, mengindikasikan tanaman tidak banyak menyerap unsur hara P dari dalam tanah saja namun juga dari sumber P lainnya yang ada di dalam tanah. Kondisi ini dinamakan radioisotop ^{32}P mengalami pengenceran oleh unsur hara P dari sumber P lain yang ada di dalam tanah. ANNUNZIATTA dan LEGG [26] menyatakan bahwa penurunan nilai cacahan ^{32}P terjadi karena adanya sumber P lain selain dari tanah, sehingga “mengencerkan” konsentrasi P di dalam jaringan tanaman.

Interaksi perlakuan kompos jerami+Biochar dengan berbagai sumber P menyebabkan respons nilai cacahan ^{32}P dalam tanaman yang berbeda.

Tabel 4. Respons cacahan ^{32}P dalam tanaman pada interaksi perlakuan dosis kompos jerami+Biochar dan sumber-sumber hara P.

Sumber hara P	Dosis kompos jerami+Biochar (t ha ⁻¹)				
	0 (k_0)	1 (k_1)	2 (k_2)	3 (k_3)	4 (k_4)
	cpm				
0 (p_0)	8233,6 a	7900,5 a	7321,9a	7855,7a	7238,9 a
	A	A	B	A	B
100 kg ha ⁻¹ SP-36 (p_1)	7732,1b	7412,5b	7228,4b	7255,1b	7302,3 b
	A	B	C	C	C
2 kg ha ⁻¹ inokulan BPF (p_2)	7630,6c	7344,2c	7419,2c	7378,9b	7455,3 b
	A	B	C	B	C
163 kg ha ⁻¹ FA (p_3)	7643,2 bc	7319,8 c	7528,7 c	7354,4c	7494,2 b
	A	B	B	BC	C
163 kg ha ⁻¹ FA + inokulan BPF (p_4)	7412,9c	7325,4c	7057,3d	6959,4d	6785,7 c
	A	B	C	C	D

Keterangan : Angka yang ditandai huruf sama tidak berbeda nyata pada uji BNT taraf 5%. Huruf kecil dibaca vertikal, huruf besar dibaca horizontal.

keberadaan kompos jerami dalam dosis tinggi membutuhkan proses dekomposisi terlebih dahulu untuk dapat melepaskan nutrisi hara dan asam organik yang terkandung di dalamnya sebagai sumber energi bagi inokulan BPF.

Cacahan ^{32}P dalam tanaman

Cacahan ^{32}P di dalam tanaman menjadi indikasi dinamika P di dalam tanah. Tingginya

Data pada Tabel 4 menunjukkan adanya penurunan nilai cacahan ^{32}P pada seluruh perlakuan, dibandingkan terhadap perlakuan p_0k_0 (tanpa kompos jerami+Biochar dan tanpa sumber hara P). Dengan kata lain pada perlakuan p_0k_0 sumber P hanya berasal dari tanah, maka tingkat pengenceran terhadap isotop ^{32}P sangat rendah. Semakin beragam sumber P dan semakin tinggi dosis kompos jerami+Biochar, secara umum

terjadi penurunan nilai cacahan ^{32}P di dalam tanaman.

Pengenceran nilai cacahan ^{32}P tidak hanya ditentukan oleh jumlah faktor pengencer, namun juga oleh konsentrasi faktor pengencer. Hal ini dapat dilihat pada perlakuan p_2 (2 kg ha^{-1} inokulan BPF) yang berinteraksi dengan perlakuan k_3 (dosis kompos jerami+Biochar 3 t ha^{-1}), nilai cacahan ^{32}P lebih rendah dibandingkan p_2 yang berinteraksi dengan perlakuan k_4 (dosis kompos jerami+Biochar 4 t ha^{-1}). Dalam hal ini diduga ketersediaan unsur hara P, sebagai unsur hara yang ditelusuri dinamikanya, lebih rendah pada saat dosis kompos jerami+Biochar ditingkatkan dari 3 t ha^{-1} menjadi 4 t ha^{-1} . Kondisi ini terjadi dapat disebabkan oleh jumlah inokulan BPF yang menurun pada dosis bahan organik yang meningkat (lihat Tabel 3), dengan demikian tingkat pelarutan P dari sumber P mengalami penurunan. Pada keadaan ini tanaman sedikit menyerap P dari sumber P yang ada, maka serapan ^{32}P kembali meningkat karena rendahnya faktor pengenceran terhadap ^{32}P di dalam tanah. Kemungkinan lainnya adalah dosis kompos jerami+Biochar yang tinggi, menyebabkan terjadinya retensi hara untuk dimanfaatkan dalam proses dekomposisi. Kandungan P potensial dalam tanah percobaan, yang tergolong pada kategori rendah, tidak mencukupi untuk memenuhi kebutuhan hara P tanaman dan kebutuhan hara bagi proses dekomposisi. Hal ini menyebabkan tanaman tidak banyak menyerap P yang tersedia, sehingga faktor pengenceran terhadap ^{32}P menjadi rendah.

Nilai cacahan ^{32}P terendah terlihat pada perlakuan p_4 (163 kg ha^{-1} FA+inokulan BPF) yang berinteraksi dengan perlakuan k_4 (dosis kompos jerami+Biochar 4 t ha^{-1}). Dalam hal ini dapat dikatakan bahwa perlakuan p_4k_4 menyebabkan tingginya faktor pengenceran terhadap serapan ^{32}P tanaman. Diduga penginokulasian BPF terhadap fosfat alam mampu meningkatkan pelarutan P di dalamnya. Inokulan BPF yang digunakan adalah *Bacillus* sp dan *Pseudomonas* sp, yang dalam hal ini terlihat bersinergi untuk melarutkan fosfat. Seperti dikemukakan oleh Widawati dan Suliasih [16] bahwa *Pseudomonas* sp dan *Bacillus* sp memiliki kemampuan yang baik dalam melarutkan fosfat. Bakteri ini tidak hanya melepaskan P dari FA, namun juga efektif melepaskan P terjerap dalam koloid tanah. Hal ini sejalan dengan pendapat EL AZOUNI dalam FITRIATIN dkk. [27], yang menyatakan bahwa

mikroorganisme pelarut fosfat lebih efektif dalam melepaskan P terjerap di dalam tanah sehingga meningkatkan serapan P oleh tanaman. Pendapat ini pula menjelaskan rendahnya nilai cacahan ^{32}P pada perlakuan 2 kg ha^{-1} inokulasi BPF (p_2) dibandingkan dengan perlakuan p_1 (100 kg ha^{-1} SP-36) dan p_3 (164 kg ha^{-1} FA).

Nilai cacahan ^{32}P ini menunjukkan bahwa pelabelan tanah dengan menggunakan radioisotop ^{32}P mampu menggambarkan dinamika P di dalam tanah. Volume larutan ^{32}P yang diinkubasikan adalah sebanyak 50 cc per pot, dengan teknik pencampuran yang homogen maka seluruh ion ^{31}P dapat ditandai. Ion ^{32}P berpasangan dengan ion ^{31}P yang berada dalam bentuk tersedia, sehingga dapat diserap tanaman dan dicacah dengan alat *Liquid Scintillation Counter*. Angka cacahan dinyatakan dalam cpm, kemudian menggunakan rumus perhitungan dikonversi menjadi $\%^{32}\text{P}$. Nilai ini kemudian digunakan untuk menghitung kontribusi setiap sumber P yang ada di dalam tanah, yang mampu diserap oleh tanaman.

Serapan P tanaman dari masing-masing sumber P

Perhitungan serapan P dari berbagai sumber fosfat dihasilkan dari konversi nilai cacahan ^{32}P dalam sampel tanaman menjadi $\%^{32}\text{P}$, dan kemudian secara proporsi difraksionisasikan menjadi $\%P$ berasal dari berbagai sumber P di dalam tanah. Secara prinsip $\%P$ -total tanaman setara dengan pencapaian nilai 100%. Maka dalam fraksionisasi kontribusi P dari berbagai sumber yang mencapai $\%P$ -total tanaman, diasumsikan sebagai berikut : $100\%P\text{-total} = \%P\text{-tanah} + \%P\text{-32} + \%P\text{-sumber P lainnya}$. Persentase masing-masing kontribusi P kemudian dinyatakan dalam μg atau mg P, melalui perkalian dengan berat kering tanaman, hasil perhitungan terlihat pada Tabel 5.

Data pada Tabel 5 menggambarkan kemampuan radioisotop ^{32}P menggambarkan secara kuantitatif kontribusi masing-masing sumber hara P terhadap serapan P-total dalam tanaman. Hasil pengujian statistik yang ditujukan pada kontribusi P berasal dari tanah dan kontribusi P berasal dari sumber P, menunjukkan adanya efek interaksi perlakuan dosis kompos jerami+Biochar dan sumber-sumber P terhadap perbedaan respons serapan P dari berbagai sumber dalam tanaman.

Tabel 5. Serapan P dari berbagai sumber P pada interaksi perlakuan dosis kompos jerami+Biochar dan sumber-sumber hara P.

Perlakuan	Serapan P tanaman dari berbagai sumber P ($\mu\text{g P tanaman}^{-1}$)				
	P-tanah	P-SP36	P-aktivitas inokulan BPF	P-FA	P- FA+inokulan BPF
0 t ha⁻¹ komchar (k₀)					
0 P (p ₀)	1807,4	0	0	0	0
100 kg ha ⁻¹ SP36 (p ₁)	1230,8	625,7	0	0	0
2 kg ha ⁻¹ inokulan BPF (p ₂)	1157,2	0	288,3	0	0
163 kg ha ⁻¹ FA(p ₃)	1082,3	0	0	495,6	0
163 kg ha ⁻¹ FA+inokulan BPF (p ₄)	1253,7	0	0	0	567,3
1 t ha⁻¹ komchar (k₁)					
0 P (p ₀)	1659,1	0	0	0	0
100 kg ha ⁻¹ SP36 (p ₁)	1128,3	598,4	0	0	0
2 kg ha ⁻¹ inokulan BPF (p ₂)	1165,7	0	376,4	0	0
163 kg ha ⁻¹ FA(p ₃)	1034,5	0	0	482,3	0
163 kg ha ⁻¹ FA+inokulan BPF (p ₄)	1053,8	0	0	0	617,9
2 t ha⁻¹ komchar (k₂)					
0 P (p ₀)	1731,2	0	0	0	0
100 kg ha ⁻¹ SP36 (p ₁)	1089,9	605,7	0	0	0
2 kg ha ⁻¹ inokulan BPF (p ₂)	1257,1	0	398,1	0	0
163 kg ha ⁻¹ FA(p ₃)	1193,5	0	0	503,5	0
163 kg ha ⁻¹ FA+inokulan BPF (p ₄)	1241,3	0	0	0	632,3
3 t ha⁻¹ komchar (k₃)					
0 P (p ₀)	1754,6	0	0	0	0
100 kg ha ⁻¹ SP36 (p ₁)	1233,2	633,2	0	0	0
2 kg ha ⁻¹ inokulan BPF (p ₂)	1272,9	0	419,7	0	0
163 kg ha ⁻¹ FA(p ₃)	1187,4	0	0	513,2	0
163 kg ha ⁻¹ FA+inokulan BPF (p ₄)	1257,3	0	0	0	657,2
4 t ha⁻¹ komchar (k₄)					
0 P (p ₀)	1687,9	0	0	0	0
100 kg ha ⁻¹ SP36 (p ₁)	1208,5	671,6	0	0	0
2 kg ha ⁻¹ inokulan BPF (p ₂)	1149,7	0	449,2	0	0
163 kg ha ⁻¹ FA(p ₃)	1283,6	0	0	528,5	0
163 kg ha ⁻¹ FA+inokulan BPF (p ₄)	1319,1	0	0	0	672,7

Data pada Tabel 6 merupakan hasil pengujian statistik, pengujian P-berasal dari tanah diperbandingkan terhadap P-berasal dari tanah sebagai respons atas interaksi perlakuan dosis kompos jerami+Biochar dengan sumber-sumber P. Demikian pula pada serapan P-berasal dari sumber-sumber P, yang diperbandingkan terhadap P-berasal dari sumber-sumber P.

Serapan P berasal dari tanah, memperlihatkan data tertinggi (1807,4 $\mu\text{g P tanaman}^{-1}$) pada perlakuan p₀k₀. Hal ini disebabkan tanaman menyerap seluruh P tersedia

dari dalam tanah, karena ketiadaan sumber hara P lain. VAHED dkk. [28] menyatakan bahwa perakaran tanaman padi memiliki kemampuan untuk mempengaruhi serapan fosfat tanaman dan biomassa tanaman. Ia juga mengatakan bahwa tanaman padi sangat responsif terhadap P tanah, karena sistem perakaran yang dimiliki memungkinkan daerah rhizosfer bersifat aerobik sehingga terjadi pelepasan O₂ ke dalam larutan tanah dan mengubah pH di sekitar perakaran. Keadaan ini menguntungkan bagi unsur hara P yang terjerap oleh koloid liat dan mineral logam,

Tabel 6. Respons serapan P dari berbagai sumber dalam tanaman pada interaksi perlakuan dosis kompos jerami+Biochar dan sumber-sumber hara P.

Sumber hara P	Dosis kompos jerami+Biochar (t ha ⁻¹)									
	0 (k ₀)		1 (k ₁)		2 (k ₂)		3 (k ₃)		4 (k ₄)	
	p-tanah	P-sumber lain	p-tanah	P-sumber lain	p-tanah	P-sumber lain	p-tanah	P-sumber lain	p-tanah	P-sumber lain
	µg P tanaman ⁻¹									
0 (p ₀)	1807,4 a	0 a	1659,1 a	0 a	1731,2 a	0 a	1754,6 a	0 a	1687,9 a	0 a
	A	A	B	A	BC	A	C	A	B	A
100 kg ha ⁻¹ SP-36 (p ₁)	1230,8 b	625,7 b	1128,3 b	598,4 b	1205,5 b	605,7 b	1233,2 b	633,2 c	1089,9 b	671,6 b
	A	A	B	B	B	B	A	A	C	C
2 kg ha ⁻¹ inokulan BPF (p ₂)	1157,2 b	395,6 c	1165,7 b	402,3 c	1257,1 c	426,5 c	1272,9 b	446,2 b	1149,7 b	428,3 c
	A	A	A	B	B	C	B	C	A	C
163 kg ha ⁻¹ FA (p ₃)	1082,3 c	358,3 d	1034,5 c	376,4 d	1193,5 c	418,1 d	1187,4 c	442,7 b	1143,6 c	383,2 d
	A	A	A	A	B	A	B	B	B	B
163 kg ha ⁻¹ FA + inokulan BPF (p ₄)	1253,7 b	567,3 b	1053,8 c	617,9 b	1241,3 c	632,3 b	1257,3 b	657,2 c	1319,1 c	672,7 b
	A	A	B	B	A	B	A	C	C	C

Keterangan :

- Pengujian statistika serapan P-tanah diperbandingkan terhadap serapan P-tanah, serapan P-sumber lain dibandingkan terhadap serapan P-sumber lain.
- Angka yang ditandai huruf sama tidak berbeda nyata pada uji BNT taraf 5%. Huruf kecil dibaca vertikal, huruf besar dibaca horizontal.

untuk melepaskan diri dan menjadi tersedia bagi tanaman. Sistem ini mampu membantu tanaman memperoleh unsur hara P dari dalam tanah, pada saat tidak terdapat penambahan unsur P dari luar lingkungan tumbuh.

Namun demikian respons pada p₀k₀ ini tidak berbeda nyata dengan respons serapan P-berasal dari tanah pada perlakuan p₀ yang mendapat dosis aplikasi kompos jerami+Biochar (k₁ s.d k₄). Diduga pemberian kompos jerami+Biochar mampu menstimulasi pelarutan P yang berada di dalam tanah, yang dinyatakan sebagai P-potensial. Hal ini sejalan dengan pernyataan NAGUMO dkk. [29] dan CARTER dkk. [30], yang menyatakan bahwa bahan organik dapat mensuplai hara sehingga memperbaiki dan meningkatkan ketersediaan hara di dalam tanah dan meningkatkan penyerapan P oleh tanaman. AFRIDA dkk. [31] menambahkan bahwa terdapat dampak aplikasi bahan organik terhadap ketersediaan fosfat dalam tanah, yaitu dari proses pendekomposisi akan dihasilkan asam-asam organik yang dapat mengkhelat kation Fe, Al dan Ca; menyediakan sumber karbon bagi bakteri

pelarut fosfat; dan mempercepat proses mineralisasi dengan melepaskan P-anorganik dan P-organik ke dalam larutan tanah.

Perlakuan pemberian sumber hara P memperlihatkan kecenderungan penurunan serapan P berasal dari tanah, disebabkan tanaman mendapat tambahan sumber hara P. Pada perlakuan p₁ (100 kg ha⁻¹ SP-36) yang tidak mendapatkan aplikasi kompos jerami+Biochar (k₀), serapan P berasal dari tanah cenderung lebih tinggi (1230,8 µg P tanaman⁻¹) dibandingkan dengan perlakuan p₁ yang berinteraksi dengan kompos jerami+Biochar. Pupuk SP-36 memiliki bentuk P₂O₅ yang mudah tersedia sehingga dapat segera diserap oleh tanaman. Keberadaan kompos jerami dalam campuran kompos jerami+Biochar membutuhkan nutrisi anorganik untuk dapat mengalami proses dekomposisi, sehingga diduga terjadi suatu kompetisi terhadap unsur hara P. Pada perlakuan p₁ ini serapan P-berasal dari sumber lain (SP-36) saat dilakukan pemberian kompos jerami+Biochar dosis 4 t ha⁻¹ (k₄) menunjukkan nilai tertinggi (671,6 µg P tanaman⁻¹), dengan serapan P-berasal dari tanah

terendah. Kondisi ini jelas disebabkan oleh bentuk P_2O_5 pada pupuk SP-36 yang lebih mudah tersedia dan dapat segera diserap oleh tanaman. Pemberian kompos jerami+Biochar mampu menjaga bentuk ketersediaan P dari pupuk SP-36, sehingga serapan P-berasal dari tanah menurun. Respons serapan P-berasal dari sumber P lain pada perlakuan p_1k_4 ini secara nyata berbeda dari perlakuan p_1k_0 , p_1k_1 , p_1k_2 dan p_1k_3 .

Perlakuan inokulasi 2 kg ha^{-1} BPF (p_2) memperlihatkan respons serapan P-berasal dari tanah tertinggi ($1272,9 \mu\text{g P tanaman}^{-1}$) pada saat berinteraksi dengan dosis kompos jerami+Biochar 3 t ha^{-1} (k_3). Perlakuan ini tidak berbeda nyata pada saat berinteraksi dengan dosis kompos jerami+Biochar 2 t ha^{-1} (k_2). Dalam hal ini dapat dikatakan bahwa dosis 2 dan 3 t ha^{-1} mampu meningkatkan aktivitas inokulan BPF dalam melarutkan P tanah. Sedangkan saat dosis kompos jerami+Biochar ditingkatkan menjadi 4 t ha^{-1} (k_4), terdapat peningkatan jumlah bahan yang tidak didukung oleh peningkatan jumlah koloni BPF. Seperti terlihat pada Tabel 3, pada perlakuan p_2k_4 terjadi penurunan jumlah populasi BPF yang signifikan. Kondisi ini dapat disebabkan oleh tidak tercukupinya kebutuhan energi dan nutrisi inokulan BPF untuk melakukan aktivitas pelarutan P, selain adanya kebutuhan nutrisi hara untuk berlangsungnya proses dekomposisi kompos jerami oleh mikroorganisme pengurai *indigenous* tanah.

Rendahnya aktivitas pelarutan P pada perlakuan p_2k_4 ini juga terlihat pada rendahnya serapan P berasal dari sumber P. Hal ini jelas disebabkan penurunan jumlah populasi inokulan BPF, dibandingkan dengan perlakuan p_2k_2 dan p_2k_3 . Perlakuan inokulasi BPF inisiatif tidak diberi kompos jerami+Biochar (p_2k_0) memperlihatkan nilai serapan P berasal dari sumber P terendah ($395,6 \mu\text{g P tanaman}^{-1}$), yang mengindikasikan kurang terpenuhinya kebutuhan energi inokulan BPF untuk melarutkan P tanah selain dari rendahnya kandungan P_2O_5 potensial tanah. Hal yang penting untuk dipahami dalam konteks P-berasal dari sumber P dalam perlakuan inokulasi BPF adalah bahwa P yang diserap tanaman bukan merupakan P berasal dari inokulan BPF. Lebih tepatnya adalah P yang dilepaskan dan diserap oleh tanaman akibat aktivitas pelarutan P yang dilakukan oleh inokulan BPF.

Perlakuan 163 kg ha^{-1} FA (p_3) memperlihatkan serapan P berasal dari tanah yang lebih rendah dibandingkan dengan perlakuan

sumber hara P lainnya (p_0 , p_1 , p_2 , dan p_4). Dalam hal ini jelas disebabkan oleh tingkat kelarutan FA yang rendah, apabila tidak didukung oleh teknologi yang mampu meningkatkan proses pelarutan P dari fosfat alam. SETYORINI dkk. [32] menyatakan bahwa fosfat alam memiliki sifat lepas lambat dan tingkat kelarutan yang rendah, sehingga dibutuhkan suatu teknologi yang dapat membantu meningkatkan pelepasan P dari fosfat alam. Teknologi yang sesuai untuk meningkatkan pelarutan P dari fosfat alam adalah inokulasi BPF ke dalam fosfat alam atau larutan tanah.

Rendahnya nilai serapan P-berasal dari tanah, juga terjadi pada nilai P-berasal dari sumber P. Pada perlakuan p_3 yang berinteraksi dengan aplikasi kompos jerami+Biochar, mulai dari dosis 1 sampai dengan 4 t ha^{-1} terlihat sedikit kenaikan serapan P berasal dari sumber P seiring peningkatan dosis kompos jerami+Biochar. Hal ini sesuai dengan pernyataan SETYORINI dkk. [32] bahwa pemberian bahan organik akan meningkatkan kelarutan P pada fosfat alam, disebabkan pelepasan asam-asam organik pada saat terjadi proses dekomposisi. Pada campuran kompos jerami dengan Biochar, masih memungkinkan terjadinya proses dekomposisi karena tidak semua bahan organik ditransformasikan menjadi karbon stabil. Komposisi 60% kompos jerami yang diterapkan dalam percobaan ini, memberikan kesempatan terjadinya dekomposisi untuk membantu pelepasan P dan mineralisasi unsur hara untuk memenuhi kebutuhan hara tanaman dan mikroorganisme tanah.

Perlakuan inokulasi BPF terhadap fosfat alam (p_4) pada tabel di atas memperlihatkan nilai serapan P yang lebih baik dibandingkan perlakuan-perlakuan sumber hara P lainnya. Pada nilai serapan P-berasal dari tanah, terlihat nilai serapan yang merupakan nilai tertinggi kedua setelah kontrol (p_0k_0). Bahkan perlakuan p_4 hampir setara dengan perlakuan pemupukan SP-36 pada dosis rekomendasi (100 kg ha^{-1}). Demikian pula pada serapan P-berasal dari sumber P, terlihat kemampuan penyediaan P yang setara dengan pemupukan SP-36 karena respons yang tidak berbeda nyata di antara kedua perlakuan (p_2 dengan p_4). Interaksi sumber hara P ini dengan kompos jerami+Biochar semakin meningkatkan ketersediaan P, terlihat dari nilai serapan P-berasal dari sumber P yang meningkat seiring pertambahan dosis kompos jerami+Biochar. Perlakuan p_4k_4 menunjukkan nilai serapan P-

berasal dari tanah dan serapan P-berasal dari sumber P tertinggi, pada saat terjadi interaksi antara kompos jerami+Biochar dengan sumber hara P. Secara statistika, perlakuan p_4k_4 ini tidak berbeda nyata dengan perlakuan p_4k_3 dan p_1k_4 .

Keseluruhan data pada Tabel 5 telah menunjukkan kemampuan radioisotop ^{32}P dalam menggambarkan dinamika P di dalam tubuh tanaman, sesuai dengan ketersediaan P sebagai dampak interaksi perlakuan kompos jerami+Biochar dengan berbagai sumber P. Penggambaran dinamika P ini juga mampu menjelaskan peranan masing-masing perlakuan yang diterapkan di dalam percobaan terhadap perilaku P yang terjadi, selain dari kontribusinya terhadap ketersediaan P secara kuantitatif.

KESIMPULAN

Aplikasi kompos jerami+Biochar dan inokulasi bakteri pelarut fosfat terhadap fosfat alam mampu memperbaiki sifat kimia dan biologi tanah, dinyatakan dalam peningkatan kandungan C-organik tanah dan jumlah populasi BPF di dalam tanah. Peningkatan C-organik tertinggi dicapai pada dosis kompos jerami+Biochar 3 t ha^{-1} yang berinteraksi dengan pemberian 163 kg ha^{-1} fosfat alam yang diinokulasi BPF. Peningkatan C-organik ini setara dengan pemberian kompos jerami+Biochar pada dosis 4 t ha^{-1} , yang juga diiringi dengan jumlah populasi BPF tertinggi. Interaksi antara kompos jerami+Biochar pada dosis tersebut dengan fosfat alam berinokulasi memberikan kontribusi ketersediaan P terbaik bagi tanaman padi. Dinamika P di dalam tanah dapat dijelaskan secara terperinci melalui aplikasi radioisotop ^{32}P yang digambarkan dalam tubuh tanaman, dan sekaligus membuktikan saling keterkaitan antara C-organik, populasi bakteri pelarut fosfat dan kontribusinya terhadap ketersediaan P bagi tanaman.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Kemenristekdikti sebagai penyedia dana penelitian melalui Skema Hibah Dikti.

DAFTAR PUSTAKA

1. Biro Pusat Statistik. Luas Lahan Sawah Menurut Provinsi. <http://www.bps.go.id/linkTabelDinamis>, Akses pada 20 April 2016, 2015.
2. Citraresmini, A., Pemulihan Kesehatan Tanah, Peningkatan Efisiensi Pemupukan (P, K) dan Hasil Padi (*Oryza sativa* L.) Berbasis IPAT-BO Akibat Pemberian Pupuk Biofossi dan Kompos Jerami-Biochar, Disertasi, Universitas Padjadjaran, Bandung, 2015.
3. Grednera B. dan Tippkotera R., Effect of Rice Straw Application on Hydrolytic Enzyme Activities in Chinese Paddy Soils. 19th World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World, 1-6 August 2010, Brisbane, Australia, Published on DVD, 2010.
4. Argawala, P.K., Microbial ecology of compost ecosystem : with special reference to mushroom compost. *Journal of Biological and Scientific Opinion*, Vol. 2 (1), 2014.
5. Simarmata, dan B. Joy., Pemanfaatan Kompos Jerami Dalam Teknologi Pemulihan Kesehatan dan Kesuburan Lahan Sawah dan Peningkatan Produksi Secara Berkelanjutan di Indonesia, Jurusan Ilmu Tanah Fakultas Pertanian Universitas Padjadjaran, 2010.
6. Syuhadah, N, and H. Rohasliney, Rice husk as biosorbent : a review, *Health and Environment Journal*, Vol. 3. No. 1, 2012.
7. Kumar, S., P. Sangwan., R. Mor. R. Dahnkhar and S. Bidra, Utilization of rice husk and their ash: a review. *Research Journal of Chemical and Environmental Sciences*, Vol. 1, 126-129, 2013.
8. Haefele, S.M., Knoblauch, C., Gummert, M., Konboon, Y., Koyama, S., Black Carbon (Biochar) in Rice-Based Systems: Characteristics and Opportunities In:

- Woods W. I., Teixeira, W. G., Lehmann J., Steiner C, Winkler Prins A, Rebellato L (Ed.) *Amazonian Dark Earths: Wim Sombroek's Vision*. Springer Netherlands, 445-463, 2009.
9. Nurida, N.L. and Rachman, A., Alternatif pemulihan lahan kering masam terdegradasi dengan formula pembenah tanah biochar di Typic Kanhapludults Lampung. Balittanah, Kementan, 2012.
10. Lehmann, J., Kern, D.C., Glaser, B., dan Woods, W.I., *Amazonian Dark Earths : Origins, Properties, Management*. Dordrecht: Kluwer Academic, 2003.
11. DeLucca, T.H., MacKenzie, M.D., dan Gundale, M.J., Biochar Effects on Soil Nutrient Transformations, Dalam J. Lehmann and S. Joseph (penyunting). *Biochar for Environmental Management: Science and Technology*. Earthscan, London. hlm : 251 – 255, 2009.
12. Dariah, A., N. L. Nurida., dan Jubaedah, Pemanfaatan pembenah tanah untuk pemulihan tanah terdegradasi yang didominasi fraksi pasir dan liat, Prosiding seminar nasional teknologi pemupukan dan pemulihan lahan terdegradasi, Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian Kementrian Pertnian, 669-679, Bogor, 2012.
13. Ponamperuma, F.N., Straw as source nutrient for wetland rice. In: Banta, S., Mendoza, C.V., (eds), *Organic matter and rice*. Los Baños, The Philippines: IRRI, 117-136, 1982.
14. Zeelie. A., Effect of Biochar on Selected Soil Physcal Properties of Sandy Soil With Low Agricultural Suitability, Stellenbosch University, 2012.
15. Singh, T. And S.S. Purohit, *Biofertilizer Technology*, Agrobios, India, hlm : 229-240, 2011.
16. Widiawati, S., dan Suliasih, Augmentation of Potential Phosphate Solubilizing Bacteria (PSB) Stimulate Growth of Green Mustard (*Brassica canventis* Ocd.) in Marginal Soil, *Biodiversitas*, 7 (1), 10-14, 2006.
17. Rondon, M.A., Lehmann, J., Ramírez, J. and Hurtado, M., Biological nitrogen fixation by common beans (*Phaseolus vulgaris* L.) increases with bio-char additions, *Biology and Fertility of Soils* 43 (6), 699-708, 2007.
18. Quilliam, R. S., H. C. Glanville., S. C. Wade., and D. L. Jones, Life in the 'charosphere'-does biochar in agriculture soil provide a significant habitat for microorganisms?. *Journal Soil Biology and Biochemistry*, 65, 287-293, 2013.
19. Lehmann, J., and M. Rondon, Biochar soil management on highly weathered soils in the humid tropics, Dalam : N. Uphoff, *et al.* (eds.), *Biological approaches to sustainable soil systems*, Florida: CRC Press, Taylor and Francis Group, H: 517-530, 2006.
20. Tanaka H, Kyaw K, Toyota K, Motobayashi T., Influence of application of rice straw, farmyard manure, and municipal biowastes on nitrogen fixation, soil microbial biomass N, and mineral N in a model paddy microcosm, *Biol Fertil Soils*, 42, 501–505, (2010).
21. Zwieten V. L., S. Kimber., S. Morris., K.Y.Chan., A. Downie., J. Rust., S. Joseph., dan A. Cowie, Effect of Biochar from Slow Pyrolysis of Pepper Mill Waste on Agronomic Performance and Soil Fertility, *Plant and Soil*, 327, 235-246, 2010.
22. Russell, AE., C.A. Cambardella., D.A. Laird., D.B. Jaynes., D.W. Meet., Nitrogen fertilizer effect on soil carbon balances in Midwestern U.S. agricultural systems, *Ecological Application Journal*, 19 (5), 1102-1113, 2009.
23. Das., S.K., Role of micronutrient in rice cultivation and management starategy in

- organic agriculture-a reappraisal, *Agricultural Science*, 5, 765-769, 2014.
24. Naqvi, S.R., Y. Uemura., and S. Yusup, Fast pyrolysis of rice husk in a drop type pyrolyzer for bio-oil and biochar production, *Australian Journal of Basic Applied Sciences*, 8 (5), 294-298, 2014.
25. Vineela C, Wani SP, Srinivasarao Ch, Padmaja B, Vittal KPR, Microbial properties of soils as affected by cropping and nutrient management practices in several long-term manurial experiments in the semi-arid tropics of India, *Appl. Soil Ecol.*, pp. 165-173, 2008.
26. L'Annunziata, M.F., dan J.O. Legg, *Isotope and Radiation in Agricultural Science*. Vol. 1. *Soil – Plant – Water Relationships*, Academic Press, New York, USA, 1984.
27. Fitriatin, B.N., A. Yuniarti, O. Mulyani, F.S. Fauziah, dan M.D. Tiara, Pengaruh Mikroba Pelarut Fosfat dan Pupuk P Terhadap P Tersedia, Aktivitas Fosfatase, P Tanaman dan Hasil Padi Gogo pada Ultisols, *J. Agrikultura*, 20 (3), 210-215, 2009.
28. Vahed, H. S., P. Shahinorokhsar., and F. Heydarnezhad, Performance of phosphate solubilizing bacteria for improving growth and yield of rice (*Oryza sativa* L.) in the presence of phosphate fertilizer, *International Journal of Agriculture and Crop Sciences*, Vol. 4 (17), 1228-1232, 2012.
29. Nagumo. T., S. Tajima., S. Chikushi., and A. Yamashita, Phosphorus balance and soil phosphorus status in paddy rice fields with various fertilizer practices, *Journal Plant Production Science*, Vol. 16 (1), 69-76, 2013.
30. Carter, S. S. Shackley. S. Sohi. T. B. Suy. and S. Haefele, The impact of biochar application on soil properties and plant growth of pot grown lettuce (*Lettuca sativa*) and cabbage (*Barssica chinensis*), *Journal Agronomy*, 3, 440-418, 2013.
31. Afrida, E., A. Rauf. H. Hanum. D. Harnowo, Effect residu pupuk organik dan penambahan pupuk anorganik terhadap sifat kimia dan biologi tanah pada lahan sawah tadah hujan, *Proseseding Seminar Nasional HITI Komda Aceh*, 2014.
32. Setyorini, D., L.R. Widowati dan S. Rochayati, Teknologi Pengelolaan Hara Tanah Sawah Intensifikasi, Dalam F. Agus, A. Adimihardja, S. Hardjowigeno, A.M. Fagi, dan W. Hartatik (penyunting). “*Tanah Sawah dan Pengelolaannya*”, hlm : 137-169, Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanah dan Agroklimat, Bogor, 2004.